

Ez a mérési feladat a szokásostól eltérő volt, hiszen egy jól ismert, könnyen megfigyelhető jelenségre kért (elméleti) magyarázatot, majd ennek a magyarázatnak valamilyen más *kísérlettel* történő alátámasztására szólította fel a versenyzőket. Sokan leírták, esetleg el is végezték az alapkísérletet, annak lényegében helyes elméleti magyarázatát is megadták, de ennél tovább nem mentek, semmilyen további kísérlettel nem próbálták igazolni feltevésüket. Sajnos ezek a dolgozatok *mérési feladat megoldásaként* nem értékelhetők!

Több versenyző is megvizsgálta, hogy módosul-e az alapkísérlet eredménye, ha tealevelek helyett más darabos anyagot szórunk a vízbe. *Soós Péter* (Kiskunhalas, Bibó I. Gimn., 12. o.t.) azt tapasztalta, hogy sok apró papírfecni, homok, mák és gríz, sőt, még a vasreszelék is a tealevelekhez hasonlóan a pohár közepén gyűlik össze, a kicsiny acélgolyók viszont a naív várakozásnak megfelelően viselkednek: kisodródznak a pohár szélére. Ebből arra következtetett, hogy a jelenség a szemcsék sűrűségén kívül a méretükkel és alakjukkal is összefügg.

Biró István (Marosvásárhely, Bolyai Farkas Líceum, 11. o.t.) azt a kérdést vetette fel, hogy vajon a forgó folyadékfelszín „behorpadásának” van-e valamilyen szerepe a tealevelek középre sodródásában. Egy poharat színültig töltött teával, majd egy üveglappal lefedte a poharat, úgy, hogy egyetlen légbuborék se maradjon a folyadék és az üveglap között. Hagyományos lemezjátszó segítségével megforgatta a poharat, majd kikapcsolva a lemezjátszót megvárta, míg először a pohár, majd idővel a kavargó tea is megáll. A tealevelek most is a pohár aljának közepén gyűltek össze, ezzel kizárta a felszín alakváltozásának szerepét, s a továbbiakban nyitott pohárral kísérletezett.

Geresdi Attila (Pécs, Árpád Fejedelem Gimn., 12. o.t.) megpróbálta a tealevelek középre sodródását számszerűen is jellemezni. Egy hagyományos lemezjátszó korongjára kifűrt puhafalapot tett, erre helyezte a teásedényt, „45-ös fordulatszámra” felpörgette a folyadékot, majd a poharat leállítva mérte a tealevelek középre sodródásához szükséges időt. (Ez az időtartam erősen ingadozó mennyiség, így csak statisztikusan, sok adat átlagolásával mérhető. Egyes tealevelek igen gyorsan, mások pedig csak viszonylag hosszú idő alatt érik el a pohár közepét, de a levelek „fürgesége” és a mérete között nincs észrevehető kapcsolat.) Feltételezte, hogy a levélkupac kialakulásában a folyadék lassulásának, tehát a víz belső sűrűlódásának lényeges szerepe van. Ennek alátámasztására különböző hőmérsékletű teával végzett kísérleteket. A Függvénytáblázat adatai szerint a 20 °C-os víz belső sűrűlódása kb. negyede a közel 100 °C-os vízének, míg a víz többi adata alig változik. Geresdi Attila mérési adatai szerint a kb. 70–80 °C-os teában átlagosan 2,5-ször hosszabb idő alatt sodródtak középre a levelek, mint az ugyanannyira megforgatott 5 °C-os teában.

A jelenség általánosan elfogadott magyarázata szerint a tealevél-kupac képződését a folyadékban kialakuló *másodlagos áramlás*, azt pedig a folyadék belső sűrűlódása (viszkózitása) okozza. A megkavart (a pohár szimmetriatengelye körül eleinte többé-kevésbé egyenletesen forgó) teában a nyomás a tengelytől vízszintes irányban távolodva egyre nő, adott tengelytávolság esetén pedig függőlegesen felfelé haladva a nyomás csökken. Az utóbbi nyomásváltozás az álló folyadékok tanulmányozásából jól ismert hidrosztatikai nyomás, az előbbi pedig a folyadék kis darabjainak körmozgásban tartásához szükséges erőkből származik. (Ha a folyadékkal együtt forgó koordináta-rendszerből írjuk le a helyzetet, akkor ott a centrifugális erők „hidrosztatikai” nyomásának tulajdoníthatjuk a pohár tengelye és széle közötti nyomáskülönbséget.) Ennek a két nyomásváltozásnak hatására alakul ki a szabad felszín forgáspároloid alakja: a megkavart tea felszíne a pohár szélénél megemelkedik, a forgástengely mentén lesüllyed, hogy a nyomás a szabad felszín mentén mindenhol ugyanakkora (nevezetesen a légköri nyomás) lehessen.

Megjegyzés. Sokan a Bernoulli-törvényre hivatkozva próbálták kideríteni a forgásban lévő folyadék nyomásviszonyait. Úgy érveltek, hogy a megkavart, örvénylő tea közepe talán gyorsabban mozog, mint a széle, emiatt középen kisebb a nyomás, mint a pohár falánál, s ennek a nyomáskülönbségnek lehet szerepe a tealevelek vándorlásában. Ez az érvelés azonban *hibás!* A helyzet éppen fordított: a folyadék a tengely közelében lassabban mozog, mint a széleken, ennek ellenére a nyomás kifelé haladva növekszik. A Bernoulli-törvény legegyszerűbb alakja („ahol nagy az áramlás sebessége, ott kicsi a folyadék nyomása”) csak *örvénymentes* áramlásokra igaz, a megkavart tea mozgása pedig nyilvánvalóan nem ilyen. Örvényes áramlásnál a Bernoulli-törvény csak egy-egy áramvonal mentén érvényes.

A keverés megszűnte után a folyadék – a pohár falával való érintkezés és a belső sűrűlódás miatt – egyre lassabban fog forogni. A körmozgás szögsebessége a pohár szélénél, illetve az edény aljánál csökken a leggyorsabb ütemben, hiszen itt érintkezik a folyadék a pohár álló, szilárd falával. A körmozgásból származó nyomás tehát egyre kisebb lesz, ezért a folyadék forgáspároloid alakú felszíne fokozatosan kisimul, miközben a pohár szélénél a folyadék lefelé, a tengelye mentén pedig felfelé áramlik. Ez a másodlagos áramlás (ami az elsődleges forgómozgásra mintegy „rarakódik”) a pohár alján sugár irányban befelé haladó mozgással jár. Ez az áramlás a pohár vízszintes fenéklapján magával tudja sodorni a víznél éppen csak nehezebb tealeveleket (vagy egyéb darabos anyagokat), de a tengely mentén felemelni már nem képes azokat. Ez a tealevélkupac-képződés jelenségének magyarázata.

A másodlagos áramlás – *Biró István* megfigyelései szerint – akkor is kialakul, amikor a folyadék felszíne (a rá helyezett üveglap miatt) mindvégig sík. Ilyenkor a felpörgetett, majd fokozatosan lefékeződő folyadék a zárt edény alap- és fedőlapjához, valamint a palástjához sűrűlódik, tehát a forgás szögsebessége az edény középmagasságában nagyobb lesz, mint az aljánál, illetve a tetejénél. A folyadék emiatt az edény szélénél a középmagasságtól kiindulva felfelé és lefelé áramlik, az alaplap és a fedőlap közelében a tengely felé folyik, majd a pohár szimmetriatengelye mentén le- illetve felszállva és a középmagasság mentén eltávolodik a tengelytől.

Mindezen elméleti megfontolások kísérleti igazolása pl. úgy történhet, hogy valamilyen módon megfordítjuk a másodlagos áramlást. Ezt úgy érhetjük el, hogy a kezdetben álló folyadékot nem kavarással, hanem a pohár segítségével hozzuk forgásba. Több versenyző választotta a hagyományos lemezjátszóval való felpörgetés módszerét, de más megoldások is akadtak. *Szilágyi Péter* (Debrecen, Kossuth L. Gyak. Gimn., 10. o.t.) például egy erős madzaggal kötötte körül

a poharat, és egy mikrofonállványhoz erősítette a fonal végét. Ezután a madzagot megsodorta, majd hagyta, hogy a pohár forgásba jöjjön. A kialakuló másodlagos áramlás hatására a tealevelek a pohár alján kifelé sodródnak, s a pohár szélén gyűrűt képeznek. Ezt többen megfigyelték és leírták, *Mózer Tamás* (Hévíz, Bibó István Gimn., 10. o.t.) szép felvételeket is küldött a látottakról. Egy befőttesüvegben levő teát fényképezett le fölülről, egyszer az álló edényben megkavart folyadékot és a benne levő leveleket, másodjára pedig a lemezjátszó által kialakított levél-elrendezést. Megfigyelt egy érdekes dinamikus jelenséget is. Az alapkísérletben a tealevelek mintegy „kicsúcsosodtak” a forgástengely mentén, utána váratlanul ellaposodtak, majd periodikusan ismétlődve alacsonyabb és magasabb csúcsok váltogatták egymást.

Vigh Máté (Pécs, PTE Babits M. Gyak. Gimn., 10. o.t.) más módszert választott. Egy széles, lapos edényben keverte, illetve lemezjátszó segítségével a pohár közvetítésével forgatta a vizet, amelybe hipermangán-szemcséket szórt. A szemcsék leragadtak az edény aljára, de a belőlük kioldódó apróbb szemcsék a folyadékkal együtt sodródva – azt megfestve – kirajzolták az áramlást.

Örvények kicsiben és nagyban

A hátsó borítónk kör alakú felvételei az alapkísérlet (felül), illetve a lemezjátszós kísérlet eredményét (alul) mutatják, jól szemléltetve a forgómozgásra ráakódó sugár irányú (befelé, illetve kifelé tartó) másodlagos áramlást. A másik két fényképen – az érdekesség kedvéért – sokkal nagyobb méretű örvényeket mutatunk be: egy hurrikánt Florida partjai felett (bal felső kép), illetve a Hubble Űrteleszkóp által az M51-es spirálgalaxisról készített felvételt. Meglepő, hogy ennyire eltérő mérettartományokban egymáshoz nagyon hasonló képződmények alakulhatnak ki.